На правах рукописи

Дзядух Станислав Михайлович

ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ И ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МДП-СТРУКТУР НА ОСНОВЕ ГЕТЕРОЭПИТАКСИАЛЬНОГО ВАРИЗОННОГО HgCdTe, ВЫРАЩЕННОГО МЕТОДОМ МОЛЕКУЛЯРНО-ЛУЧЕВОЙ ЭПИТАКСИИ, С РАЗЛИЧНЫМИ ДИЭЛЕКТРИКАМИ

01.04.10 – физика полупроводников

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Томск – 2010

Работа выполнена в государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Томский государственный университет» и обособленном структурном подразделении «Сибирский физико-технический институт Томского государственного университета»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор Войцеховский Александр Васильевич

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор Толбанов Олег Петрович

доктор технических наук, старший научный сотрудник Вилисов Анатолий Александрович

Ведущая организация: Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Томский университет систем управления и радиоэлектроники»

Защита состоится 23 декабря 2010 г. в 14 час. 30 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.267.07 при ГОУ ВПО «Томский государственный университет» (634050, г. Томск, пр. Ленина, 36).

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке ГОУ ВПО «Томский государственный университет» (г. Томск, пр. Ленина, 34а).

Автореферат разослан 19 ноября 2010 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник И. В. Ивонин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В настоящее время $Hg_xCd_{1-x}Te$ является основным материалом для создания высокочувствительных инфракрасных матриц фотодиодов и фоторезисторов для спектральных диапазонов окон прозрачности атмосферы 3-5 и 8-12 мкм. Благодаря своим фундаментальным свойствам $Hg_xCd_{1-x}Te$ может использоваться для создания многоцветных фотоприемников, а также детекторов, действующих как в ближней, так и в дальней областях инфракрасного диапазона. Долгое время не удавалось использовать потенциальные преимущества данного материала при создании новых типов приборов электроники и фотоники из-за серьезных технологических проблем, которые присущи материалу, полученному объемными методами [1].

Метод молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) $Hg_{1-x}Cd_xTe$ предоставляет новые возможности создания монолитных и гибридных вариантов фотоприемных устройств. Преимущества МЛЭ $Hg_{1-x}Cd_xTe$ заключаются в контролируемом изменении состава при выращивании сложных приборных структур, высокой воспроизводимости процессов при увеличении степени автоматизации, реализации малой толщины контролируемого слоя, а также в получении поверхностей с гладким рельефом.

В настоящее время уже применяются приповерхностные варизонные слои с повышенным составом при выращивании гетероэпитаксиальных структур (ГЭС) $Hg_{1-x}Cd_xTe$ для матриц инфракрасных фотодиодов. Варизонные слои позволяют улучшить пороговые характеристики детекторов путем снижения роли поверхностной рекомбинации, а также уменьшить последовательное сопротивление фотодиодов на основе $Hg_{1-x}Cd_xTe$[2].

Одной из важных технологических проблем разработки фотоприемников на основе $Hg_xCd_{1-x}Te$ МЛЭ является пассивация поверхности необходимая для исключения влияния токов поверхностной утечки, снижения вкладов процессов поверхностной и туннельной рекомбинации носителей заряда, уменьшения плотности поверхностных состояний на границе раздела диэлектрик-полупроводник.

Актуальность решения данной проблемы определяется важностью создания стабильных приборов оптоэлектроники на основе $Hg_{1-x}Cd_xTe$. Для этого необходимо определение параметров границы раздела диэлектрик-полупроводник из исследований электрофизических характеристик поверхностно-барьерных структур, а также разработка методик определения параметров границы раздела для многослойных приборных структур, содержащих варизонные слои и области с неоднородностями состава.

Цель работы – исследование электрофизических и фотоэлектрических характеристик МДП-структур на основе ГЭС $Hg_{1-x}Cd_xTe$ МЛЭ с приповерхностными варизонными слоями с повышенным составом и определение параметров границ раздела варизонного $Hg_{1-x}Cd_xTe$ МЛЭ с различными диэлектрическими покрытиями.

Объектом исследований данной диссертационной работы являются гетероэпитаксиальные структуры HgCdTe, выращенные методом молекулярно лучевой эпитаксии на подложках из GaAs в ИФП СО РАН г. Новосибирск в лаборатории технологии эпитаксии из молекулярных пучков соединений A_2B_6.

Для согласования кристаллических решеток GaAs и HgCdTe, на подложке выращивались буферные слои ZnTe толщиной (0.05-0.1) мкм и CdTe толщиной (6.2-6.4) мкм. В процессе выращивания с обеих сторон эпитаксиальных пленок $Hg_{1-X}Cd_XTe$ (x=0.21-0.38) толщиной (4.1 - 12.4) мкм, создавались эпитаксиальные слои с переменным составом CdTe (широкозонные варизонные слои), а состав на поверхности достигал 0.58. Исследования проводились также на структурах с выращенными периодически расположенными тремя областями “барьерного типа” с составом x=0.71-0.94 и толщиной около 50 нм. Для создания МДП-структур на поверхность пленок $Hg_{1-X}Cd_XTe$ наносились различные диэлектрические покрытия: анодно-окисная пленка (АОП), двухслойный низкотемпературный диэлектрик SiO_2/Si_3N_4, а также CdTe, CdTe/ZnTe, $CdTe/ZnTe/SiO_2/Si_3N_4$. Перед нанесением диэлектрических покрытий для части образцов производилось удаление варизонного слоя путем травления.

Научная новизна работы определяется следующими результатами.

1) впервые проведены систематические исследования электрофизических и фотоэлектрических свойств МДП-структур на основе ГЭС $Hg_{1-x}Cd_xTe$, выращенных методом МЛЭ, в широком диапазоне параметров $Hg_{1-x}Cd_xTe$ и условий измерения;

2) впервые предложены методики определения основных параметров МДП-структур на основе ГЭС $Hg_{1-x}Cd_xTe$ МЛЭ, учитывающие влияние на измеряемые характеристики приповерхностных варизонных слоев с повышенным составом и сопротивления объема эпитаксиальной пленки;

3) впервые экспериментально исследованы закономерности формирования электрофизических и фотоэлектрических характеристик МДП-структур на основе ГЭС $Hg_{1-x}Cd_xTe$ МЛЭ с приповерхностными варизонными слоями с повышенным составом при различных параметрах варизонных слоев, а также с периодическими областями с резким изменением состава при различном расположении этих областей относительно границы раздела;

4) впервые определены основные параметры границы раздела ГЭС $Hg_{1-x}Cd_xTe$ МЛЭ с приповерхностными варизонными слоями с повышенным составом с различными диэлектрическими покрытиями (анодный оксид, SiO_2/Si_3N_4, выращенные *in situ* CdTe и CdTe/ZnTe).

5) разработана модель формирования емкостных характеристик МДП-структур на основе гетероэпитаксиального *n(p)*-$Hg_{1-x}Cd_xTe$ МЛЭ (x=0.21−0.38) с учетом варизонных приповерхностных слоев с экспоненциальным распределением состава CdTe и последовательного сопротивления эпитаксиальной пленки адекватно описывающая экспериментальные электрофизические характеристики.

Практическая ценность работы заключается в следующем:

1) Разработанные методики определения основных параметров МДП-структур на основе ГЭС $Hg_{1-x}Cd_xTe$ МЛЭ с приповерхностными варизонными слоями с повышенным составом могут использоваться для контроля параметров пассивирующих покрытий для различных приборов оптоэлектроники на основе ГЭС $Hg_{1-x}Cd_xTe$ МЛЭ.

2) Полученные данные об основных параметрах диэлектриков и границ раздела варизонного $Hg_{1-x}Cd_xTe$ МЛЭ с различными диэлектрическими покрытиями могут применяться для выбора оптимального пассивирующего покрытия матричных

фотоприемников инфракрасного диапазона на основе ГЭС $Hg_{1-x}Cd_xTe$ МЛЭ. Показано, что для пассивации фотоприемных элементов на основе ГЭС $Hg_{1-x}Cd_xTe$ МЛЭ могут использоваться низкотемпературный двухслойный диэлектрик SiO_2/Si_3N_4, а также выращенные *in situ* в процессе эпитаксиального роста структуры слои CdTe, в частности с дополнительными внешними подслоями.

3) Результаты исследований электрофизических и фотоэлектрических характеристик МДП-структур на основе ГЭС $Hg_{1-x}Cd_xTe$ МЛЭ с приповерхностными варизонными слоями с повышенным составом могут использоваться для управления характеристиками приборов электроники и оптоэлектроники.

Основные положения, выносимые на защиту:

1) МДП-структуры на основе гетероэпитаксиальных пленок *n*-$Hg_{1-x}Cd_xTe$ МЛЭ (x=0.21−0.23), содержащих приповерхностные варизонные слои толщиной (0.25-0.70) мкм с экспоненциальным распределением состава CdTe от значения в рабочем однородном слое до состава 0.43-0.48 на границе раздела диэлектрик-полупроводник, при температуре (78-100) К характеризуются по сравнению с аналогичными структурами без варизонных слоев увеличением в 1.2-2 раза глубины и ширины провала на низкочастотных ((1−200) кГц) зависимостях емкости от напряжения, а также отсутствием спада на зависимости фотоЭДС от напряжения в сильной инверсии, что связано с уменьшением скорости генерации неосновных носителей заряда в области пространственного заряда и подавлением процессов туннелирования через глубокие уровни.

2) Увеличение состава на границе раздела с диэлектриком от 0.34 до 0.49-0.58 при толщине приповерхностного варизонного слоя 1.6-1.8 мкм приводит к переходу вольт-фарадных характеристик МДП-структур на основе гетероэпитаксиальных структур $Hg_{1-x}Cd_xTe$ МЛЭ (x=0.22) p-типа проводимости к высокочастотному виду на частотах, превышающих 10 кГц, а также к отсутствию спада на зависимости фотоЭДС от напряжения в сильной инверсии, что определяется увеличением дифференциального сопротивления области пространственного заряда и подавлением межзонной туннельной генерации при концентрации дырок до (10^{16}-10^{17}) $см^{-3}$.

3) Создание в приповерхностном варизонном слое эпитаксиальной пленки n-$Hg_{1-x}Cd_xTe$ МЛЭ (x=0.30-0.32) периодически расположенных областей “барьерного типа” с составом x=0.81-0.94 и толщиной около 50 нм приводит к снижению низкочастотной емкости в режиме обогащения на величину 10-15 пФ (при величине емкости диэлектрика около 50 пФ), уменьшению времени жизни неравновесных носителей заряда (от 31 мкс до 15 мкс) и постоянству температурной зависимости фотоЭДС в интервале (80-150)К, что обусловлено возникновением потенциальных барьеров для электронов и рекомбинационными процессами на границах областей с резкими неоднородностями по составу.

4) Нанесение в едином технологическом процессе выращивания полупроводниковой гетероэпитаксиальной структуры функциональных диэлектриков CdTe или CdTe/ZnTe на поверхность *n*(*p*)-$Hg_{1-x}Cd_xTe$ МЛЭ (x=0.22-0.38) с приповерхностными варизонными слоями повышенного состава толщиной 0.25-0.70 мкм и составом на поверхности 0.42-0.50 обеспечивает следующие параметры созданных МДП-структур: плотности подвижного и фиксированного

зарядов не превышающие $9.0 \cdot 10^{9}$ см$^{-2}$ и $5.5 \cdot 10^{10}$ см$^{-2}$, соответственно, плотность поверхностных состояний не более $2.7 \cdot 10^{11}$ эВ$^{-1}$см$^{-2}$ при T=78K.

Достоверность полученных результатов подтверждается: корректностью методик, использованных при исследованиях электрофизических и фотоэлектрических свойств, сопоставлением результатов, полученных при помощи различных методик. Основные выводы получены в результате экспериментального исследования характеристик большого числа образцов. Полученные в работе сведения о свойствах МДП-структур на основе ГЭС $Hg_{1-x}Cd_xTe$ МЛЭ согласуются с результатами расчетов и известными результатами исследований других авторов. Результаты работы не противоречат современным представлениям о процессах в МДП-структурах на основе узкозонных полупроводников.

Личный вклад автора. При получении результатов данной работы автором внесен существенный вклад, состоящий в следующем: участие в постановке задач, в проведении экспериментов и численных расчетов; обработка и интерпретация результатов экспериментов и расчетов.

Связь с плановыми работами. Результаты диссертационной работы использовались при выполнении ряда НИР, в частности с ФГУП «НПО «Орион» (НИР «Исследование и разработка методов контроля электрофизических свойств приповерхностных слоев ГЭС КРТ МЛЭ методами CV-метрии», являющейся составной частью НИР «Разработка промышленной технологии выращивания гетероэпитаксиальных структур теллурида кадмия-ртути дырочного типа проводимости на оптически прозрачных подложках методом молекулярно-лучевой эпитаксии», шифр «Прозрачность», выполняемой на основании государственного контракта с Минпромторгом России в рамках Федеральной целевой программы «Разработка, восстановление и организация производства стратегических, дефицитных и импортозамещающих материалов и малотоннажной химии для вооружения, военной и специальной техники на 2009-2011 годы и на период до 2015 года».), с ИФП СО РАН (НИР «Исследование зонной диаграммы наноструктур и свойств границы раздела защитный диэлектрик-гетероэпитаксиальный полупроводник КРТ», проводимой на основании государственного контракта от 17 августа 2007 г. №02.523.12.3006 «Разработка базовой технологии полупроводниковых наноструктур для источников и приемников излучения систем оптического мониторинга») выполняемой в рамках ФЦП «Исследование и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2012 г.», АВЦП «Развитие научного потенциала высшей школы» на 2009 г., Рег. номер 2.1.2/6551 (НИР «Физические принципы создания фоточувствительных и светоизлучающих наногетероструктур КРТ МЛЭ»).

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на IX международной конференции «Физико-химические процессы в неорганических материалах (Кемерово – 2004 г.), IV–VI международных конференциях «Фундаментальные проблемы оптики» IV–VI международного оптического конгресса «Оптика – XXI век» (Санкт-Петербург – 2006, 2008, 2010 гг.), XI и XIV международных научно-технических конференциях «Высокие технологии в промышленности России», международном симпозиуме «Тонкие пленки в

электронике» (Москва – 2005, 2008 гг.), Российском совещании по актуальным проблемам полупроводниковой фотоэлектроники «Фотоника-2008», (Новосибирск – 2008 г.), IX Российской конференции по физике полупроводников (Новосибирск-Томск – 2009 г.), E-MRS 2009 Fall Meeting (Warsaw – 2009 г.), 19-21 Международных конференциях по фотоэлектронике и приборам ночного видения (Москва – 2006,2008, 2010 г.г.), русско-немецком форуме «Nanophotonics and Nanomaterials» (Томск – 2010 г.), 1–3 Международных научно-практических конференциях«Актуальные проблемы радиофизики» (Томск – 2006, 2008, 2010 гг.).

Публикации. По материалам диссертационной работы получен один патент, опубликовано 11 статей в журналах, рекомендованных ВАК, 8 статей в российских журналах и 16 тезисов докладов и материалов международных и российских конференций. Всего опубликовано 36 работ, которые приведены в списке литературы.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, одного приложения и содержит 127 страниц машинописного текста, 141 рисунок, 23 таблицы, список используемой литературы из 172 наименований. Общий объем диссертации составляет - 240 страниц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность диссертационной работы, формулируется цель и основные задачи исследований, отмечается научная новизна поставленной задачи, обосновываются достоверность и практическая ценность результатов, полученных в процессе проведенных исследований, излагаются основные положения, выносимые на защиту. Представлен краткий обзор содержания глав диссертации.

В первой главе проведен краткий обзор литературных источников по свойствам полупроводникового твердого раствора HgCdTe, приборам на его основе, свойствам различных диэлектрических покрытий, использующимся для пассивации поверхности HgCdTe, и результатам исследований границы раздела диэлектрик-полупроводник. Кратко описаны фундаментальные свойства материала HgCdTe, приведены основные электрические и оптические параметры, используемые при моделировании процессов в приборах оптоэлектроники на основе HgCdTe. При рассмотрении технологий получения материала, делается вывод о перспективности использования метода молекулярно-лучевой эпитаксии для выращивания высококачественного HgCdTe. При рассмотрении существующих типов детекторов проводится краткий обзор их характеристик и технологий создания, большое внимание уделяется различным диэлектрическим покрытиям, используемым для защиты поверхности приборов. Подавляющее большинство результатов исследования свойств границ раздела с различными покрытиями, представленных в литературе, получены на материале, выращенном объемными методами [2], и лишь в последние годы появились немногочисленные работы, которые посвящены исследованиям МДП-структур на основе варизонного HgCdTe МЛЭ [3,4]. В завершении главы представлен обзор результатов исследований электрофизических и фотоэлектрических характеристик МДП-структур на основе HgCdTe, рассматривается влияние различных факторов на

вольт-фарадные характеристики структур. По результатам литературного обзора в выводах к главе сформулированы цели и задачи исследований.

Во второй главе дано систематическое описание параметров исследованных образцов. Приводятся графики распределения состава по толщине эпитаксиальной пленки (рисунки 1 и 2). Описаны диэлектрические покрытия, использованные в качестве функциональных диэлектриков. В представленных таблицах приведены основные геометрические и электрические параметры гетероэпитаксиальных структур.

Затем проводится описание экспериментальных установок, предназначенных для проведения исследований электрофизических и фотоэлектрических характеристик МДП-структур на основе ГЭС HgCdTe МЛЭ. Описываются принципы действия данных установок и приводятся формулы для определения измеряемых емкости и проводимости при использовании параллельной схемы замещения. Также в данной главе предлагается методика исключения влияния сопротивления объема однородной эпитаксиальной пленки, которое оказывает значительное влияние на измеряемые методом полной

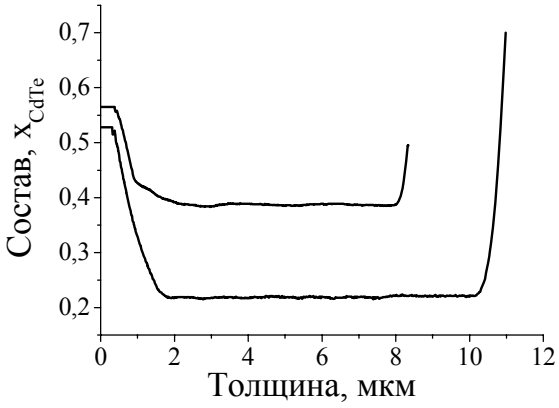

Рис. 1. Примеры распределения состава по толщине эпитаксиальных пленок $Hg_{1-x}Cd_xTe$. Толщина отсчитывается от границы с буферными слоями.

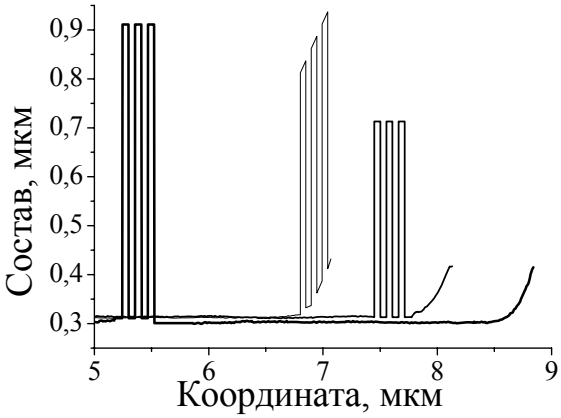

Рис. 2. Распределения составов в приповерхностной области $Hg_{1-x}Cd_xTe$ по толщине эпитаксиальных пленок для структур с периодическими областями “барьерного типа”.

проводимости параметры МДП-структур на основе ГЭС HgCdTe МЛЭ на высоких частотах (200 кГц - 1 МГц).

В третьей главе приводятся результаты расчета электрофизических и фотоэлектрических характеристик МДП-структур на основе ГЭС HgCdTe МЛЭ. Проведен расчет ВФХ МДП-структур на основе HgCdTe с учетом эффектов вырождения и непараболичности зон [1] при использовании современных аппроксимаций интегралов Ферми-Дирака [5]. Показано, что эффекты вырождения и непараболичности зон приводят к уменьшению емкости в режиме обогащения для *n*-HgCdTe (в режиме сильной инверсии для *p*-HgCdTe), а для остальных режимов существенного влияния этих эффектов на ВФХ МДП-структур не оказывается.

Для изучения влияния на электрофизические характеристики МДП-структур на основе ГЭС HgCdTe МЛЭ приповерхностных варизонных слоев с повышенным составом было проведено численное моделирование зависимостей потенциала от напряжения, а также расчет низкочастотных и высокочастотных идеальных ВФХ путем численного решения уравнения Пуассона при линейном и экспоненциальном распределении состава в варизонном слое. Показано, что для структур с приповерхностными варизонными слоями поверхностный потенциал в сильной инверсии выше, чем для однородного HgCdTe, и зависит от толщины варизонного слоя.

Установлено, что при включении варизонного слоя с повышенным составом увеличивается глубина и ширина провала на низкочастотных ВФХ (рисунок 3, кривые 1, 3), что связано с изменением характера генерации неосновных носителей заряда в приповерхностном варизонном слое. Данное поведение ВФХ хорошо согласуется с проведенными численными расчетами, учитывающими наличие приповерхностных варизонных слоев (рисунок 3, кривые 2, 4).

Для изучения влияния на электрофизические параметры МДП-структур продольного сопротивления объема эпитаксиальной пленки проведен расчет при помощи метода эквивалентных схем зависимостей измеряемых дифференциальных емкости и сопротивления МДП-структуры от элементов, характеризующих область пространственного заряда (ОПЗ), при различных частотах и различных величинах сопротивления объема эпитаксиального слоя. Установлено, что сопротивление объема эпитаксиального слоя (при его значениях более 100 Ом) существенно влияет на измеряемые характеристики МДП-структуры при использовании параллельной схемы замещения, что проявляется, например, в уменьшении емкости МДП-структуры в обогащении с ростом частоты. Теоретически предсказано уменьшение емкости в обогащении при больших значениях сопротивлениях объема рабочего слоя и больших емкостях диэлектрика. Показано, что для расчета дифференциального сопротивления ОПЗ ($R_{ОПЗ}$) из экспериментальных данных необходим учет влияния сопротивления объема эпитаксиальной пленки.

Так как на низких частотах модуль фотоЭДС пропорционален дифференциальному сопротивлению ОПЗ ($R_{ОПЗ}$) [1], поэтому проведен анализ основных механизмов генерации неосновных носителей заряда в ОПЗ МДП-структур на основе ГЭС HgCdTe МЛЭ при разных температурах. При расчете полного темнового тока, определяющего $R_{ОПЗ}$, учитывались составляющие, связанные с межзонным туннелированием, туннелированием через глубокие уровни и с диффузией носителей заряда. При этом рассматривались следующие механизмы рекомбинации: Оже-рекомбинация, туннелирование и рекомбинация через центры Шокли-Рида.

В четвертой главе приводятся результаты экспериментальных исследований влияния приповерхностных варизонных слоев с повышенным составом на электрофизические и фотоэлектрические характеристики МДП-структур на основе ГЭС HgCdTe МЛЭ. Показано, что в случае наличия приповерхностного варизонного слоя с экспоненциальным распределением состава от состава рабочего слоя до состава 0.43-0.48 на поверхности при толщине варизонного слоя 0.25-0.70 мкм глубина и ширина провала на низкочастотной ВФХ МДП-структуры

на основе *n(p)*-$Hg_{1-x}Cd_xTe$ МЛЭ (x=0.21−0.23) увеличивается не менее чем в 1.2 раза (рисунок 4). К увеличению глубины и ширины провала на ВФХ при наличии варизонных слоев приводит изменение характера генерации неосновных носителей в приповерхностной варизонной области полупроводника. Кроме того, для МДП-структур на основе *n*(*p*)-$Hg_{1-X}Cd_XTe$ с приповерхностными варизонными слоями для диэлектриков типа АОП и SiO_2/Si_3N_4 характерно увеличение гистерезиса прямого и обратного хода ВФХ по сравнению с однородными структурами.

При исследовании МДП-структур на основе гетероэпитаксиальных структур $Hg_{1-x}Cd_xTe$ МЛЭ (x=0.22) p-типа проводимости было установлено, что увеличение состава на границе раздела с диэлектриком от 0.34 до 0.49-0.58 при толщине приповерхностного варизонного слоя 1.6-1.8 мкм приводит к переходу ВФХ к высокочастотному виду на частотах, превышающих 10 кГц.

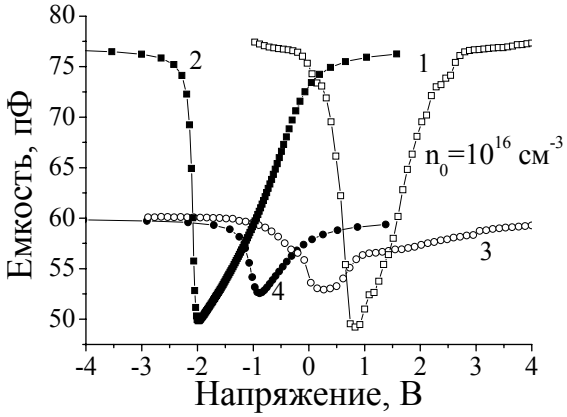

Рис. 3. Экспериментальные (1,3) и идеальные (2,4) низкочастотные ВФХ МДП-структур на основе *n*-$Hg_{0.78}Cd_{0.22}Te/SiO_2/Si_3N_4$ ($n_0=10^{16}$ см$^{-3}$) с варизонным слоем (1,2) и без варизонного слоя (3,4).

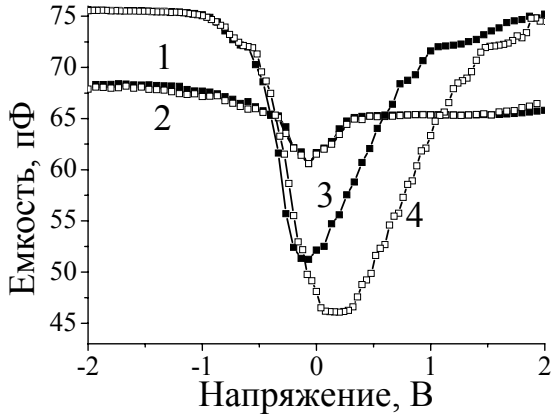

Рис. 4. ВФХ МДП-структур n-$Hg_{0.77}Cd_{0.23}Te/SiO_2/Si_3N_4$ ($n_0=3.7\times10^{14}$ см$^{-3}$) без варизонного (кривые 1, 2) и с варизонным слоем (кривые 3, 4) на частоте 10 кГц, прямые (1, 3) и обратные развертки (2, 4) по напряжению.

Исследования фотоЭДС, проведенные при засветке со стороны подложки МДП-структур на основе эпитаксиальной пленки *n*-$Hg_{1-x}Cd_xTe$ (x≈0.21-0.23), позволили установить, что вид зависимостей фотоЭДС от напряжения смещения, зависит от наличия приповерхностных варизонных слоев. В случае отсутствия варизонного слоя происходит снижение уровня фотоэдс с ростом напряжения в области сильной инверсии, а при наличии широкозонного варизонного слоя, снижения уровня сигнала фотоэдс не происходит и фотоЭДС в сильной инверсии имеет “классический” вид с выходом на насыщение (рисунок 5). Это объясняется тем, что наличие приповерхностных варизонных слоев в структурах приводит к подавлению туннелирования носителей заряда через глубокие уровни, которое снижает дифференциальное сопротивление ОПЗ в сильной инверсии, приводя к понижению уровня фотоЭДС.

При проведении исследований фотоЭДС МДП-структур на основе *p*-$Hg_{1-x}Cd_xTe$ (x≈0.21-0.23) оказалось, что для большинства структур типичен классический вид

полевой зависимости фотоЭДС независимо от наличия приповерхностного широкозонного слоя. Это свидетельствует о том, что в таких структурах дифференциальное сопротивление ОПЗ не ограничено туннелированием через глубокие уровни. Однако для высоких концентраций дырок ($>5\times10^{15}$ см$^{-3}$) возможен спад фотоЭДС в сильной инверсии из-за межзонного туннелирования. В результате экспериментальных исследований показано, что увеличение состава на границе раздела с диэлектриком от 0.34 до 0.49-0.58 при толщине приповерхностного варизонного слоя 1.6-1.8 мкм приводит к отсутствию спада на зависимости фотоЭДС от напряжения в сильной инверсии при концентрации дырок до (10^{16} - 10^{17}) см$^{-3}$. Это означает, что наличие приповерхностных варизонных слоев на границе раздела эпитаксиальной пленки *p*-$Hg_{1-x}Cd_xTe$ ($x\approx0.21$-0.23) с диэлектрическим покрытием приводит к подавлению межзонной туннельной генерации в режиме сильной инверсии.

Исследования зависимостей фотоЭДС от частоты модуляции интенсивности излучения позволило установить связь частоты среза (частоты, при которой фотоЭДС составляет 0.707 от низкочастотного значения) с исходными данными по времени жизни неосновных носителей, полученными при помощи бесконтактного СВЧ метода. Установлено, что эффективное время жизни неравновесных носителей заряда в ОПЗ для МДП-структур на основе HgCdTe с $x\approx0.20$ с варизонными слоями, оказывается большим, чем в случае отсутствия варизонных слоев. Этот факт говорит о том, что наличие встроенного электрического поля, образованного варизонными слоями, приводит к уменьшению влияния поверхностной рекомбинации на эффективное время жизни носителей заряда в ОПЗ в сильной инверсии.

Были проведены измерения температурных зависимостей фотоэдс для МДП-структур *n*(*p*)-HgCdTe с двухслойным диэлектриком SiO_2/Si_3N_4. Для МДП-структур на основе гетероэпитаксиального *n*-$Hg_{1-x}Cd_xTe$ МЛЭ (x=0.21-0.23) без приповерхностного варизонного слоев типично увеличение фотоЭДС в сильной инверсии при нагреве структуры от 78 К до 100 К, что связано с уменьшением роли туннельной рекомбинации через глубокие уровни при увеличении ширины запрещенной зоны HgCdTe (рисунок 6, кривая 3). Увеличения фотоЭДС при нагреве от 78 К до 100 К не наблюдается для МДП-структур на основе *p*-$Hg_{1-x}Cd_xTe$ МЛЭ (рисунок 6, кривые 4,5), а также для МДП-структур на основе *n*-$Hg_{1-x}Cd_xTe$ с варизонным слоем (рисунок 6, кривая 1). Высокотемпературный спад фотоЭДС обусловлен ростом роли Оже-рекомбинации.

Проведены исследования влияния периодически расположенных областей с резко повышенным составом (состав увеличивался от x=0.32 до 0.71-0.91) толщиной 48-54 нм (рисунок 2) на характеристики МДП-структур на основе *n*-$Hg_{1-X}Cd_XTe$ (x=0.29-0.31) при различном положении этих областей относительно границы раздела $Hg_{1-X}Cd_XTe$ – диэлектрик. Установлено, что при расположении барьерных областей в варизонном слое таких структур, ВФХ измеренные на частотах до 10 кГц, обладали меньшей емкостью в области обогащения по сравнению с емкостью в сильной инверсии (рисунок 7). Данное поведение ВФХ свидетельствует о том, что группа слоев с увеличенным составом x, расположенных в варизонном слое $Hg_{1-X}Cd_XTe$, представляет собой барьер для основных носителей заряда – электронов. За счет существования этого барьера

происходит эффективное увеличение толщины диэлектрика для основных носителей заряда, в результате чего и наблюдается снижение уровня емкости в обогащении.

Установлено, что наличие областей барьерного типа в варизонном слое приводит к уменьшению эффективного времени жизни неравновесных носителей заряда от 31 мкс до 15 мкс и постоянству фотоЭДС в диапазоне температур (80-150)К, что обусловлено рекомбинационными процессами на границах областей с резкими неоднородностями по составу.

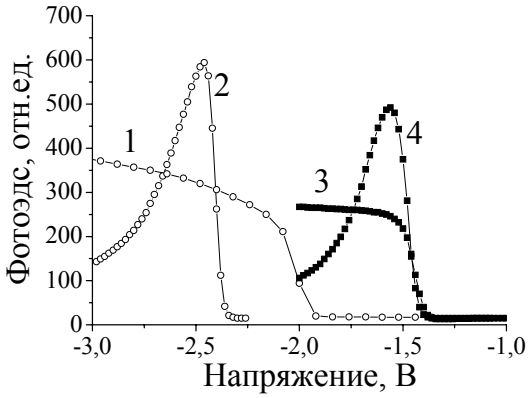

Рис. 5. Полевые зависимости фотоЭДС МДП-структур n-$Hg_{0.77}Cd_{0.23}Te$ ($n_0=3.7\times10^{14}$) с АОП нанесенной из источника КОН (кривые 1,2) и аммиачного источника (кривые 3,4), без варизонного (2,4) и с варизонным слоем (1,3).

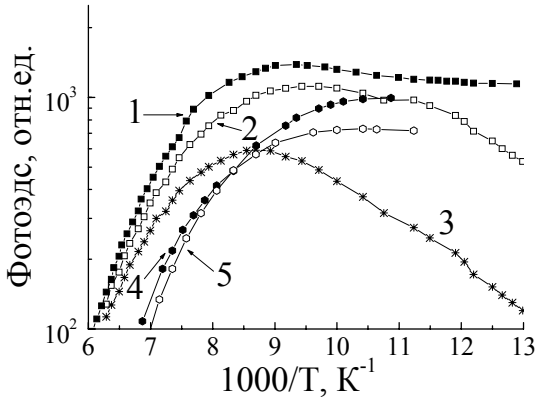

Рис. 6. Зависимости фотоЭДС от обратной температуры для МДП-структур на основе *n*-$Hg_{0.78}$ $Cd_{0.22}Te$ с варизонным слоем (кривая 1) и без варизонного слоя (2– в максимуме фотоэдс, 3 – сильная инверсия), на основе *p*-$Hg_{0.78}Cd_{0.22}Te$ с варизонным слоем(4) и без варизонного слоя(5)

В пятой главе приведены результаты исследований свойств границ раздела варизонного HgCdTe с различными пассивирующими покрытиями. В начале главы приводятся результаты экспериментального исследования влияния нанесения различных диэлектрических покрытий на вид ВФХ МДП-структур на основе *n*- и *p*-$Hg_{1-X}Cd_XTe$ (x=0.21-0.31) с варизонными слоями.

При исследовании структур, в качестве диэлектрического покрытия которых была использована АОП, было выяснено, что при первом измерении в оксидной пленке происходит значительное накопление положительного заряда, который имеет большое время релаксации и приводит к сдвигу ВФХ вдоль оси напряжений. Проведение исследований структур, пассивированных низкотемпературным двухслойным диэлектриком SiO_2/Si_3N_4, показало малое, по сравнению с АОП, напряжение плоских зон, которое не зависит от предварительной подачи и времени выдержки напряжения смещения на структуре. В случае наличия варизонного слоя для МДП-структур с данным типом диэлектриков, происходит увеличение гистерезиса прямого и обратного хода развертки ВФХ по напряжению. Характер гистерезиса зависит от типа проводимости полупроводниковой пленки и нанесенного диэлектрика. Для структур с анодным оксидом типичен гистерезис ВФХ, связанный со смещением

подвижного заряда в диэлектрике, для двухслойного диэлектрика SiO_2/Si_3N_4, нанесенного на *n*-HgCdTe, характерен гистерезис инжекционного типа, связанный с захватом электронов на состояния вблизи границы раздела при положительных напряжениях и выбросом электронов из этих состояний при отрицательных напряжениях.

При исследовании МДП-структур с нанесенными *in situ* слоями CdTe и CdTe/ZnTe в качестве защитных покрытий выяснилось, что для данных диэлектрических покрытий характерен малый гистерезис прямой и обратной развертки по напряжению и небольшое напряжение плоских зон (рисунок 8). На основании результатов исследования можно заключить, что нанесение *in situ* слоев CdTe и CdTe/ZnTe в качестве защитного покрытия приводит к формированию качественной границы раздела с малыми плотностями фиксированного заряда и практически отсутствующим подвижным зарядом.

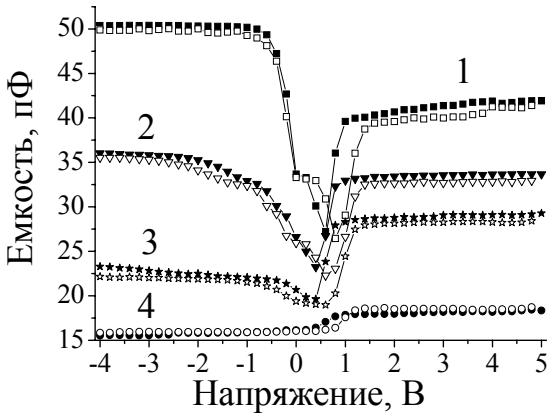

Рис. 7. ВФХ для МДП-структуры на основе n-$Hg_{0.7}Cd_{0.3}Te/SiO_2/Si_3N_4$ (n_0=1,9·10^{14}) с группой слоев повышенного содержания CdTe, расположенной в варизонном слое. Частоты сигнала: 2 кГц (кривая 1); 50 кГц (2); 200 кГц (3); 1 МГц (4). Прямые (заполненные фигуры) и обратные (полые фигуры) направления разверток.

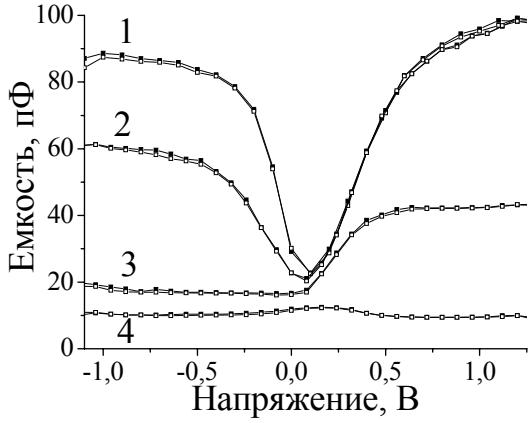

Рис. 8. ВФХ МДП-структур n-$Hg_{0.66}Cd_{0.34}Te$ (n_0=8,7·10^{13}) с CdTe измеренные на частотах 2 кГц (кривая 1), 10 кГц (2), 200 кГц (3), 1 МГц (4) при прямых и обратных направлениях развертки по напряжению.

Выводы, сделанные из сравнительного анализа вида ВФХ для МДП-структур на основе ГЭС HgCdTe МЛЭ с приповерхностными варизонными слоями с повышенным составом для различных диэлектрических покрытий, подтверждаются результатами определения параметров границ раздела диэлектрик-полупроводник. Согласно полученным данным для МДП-структур на основе ГЭС HgCdTe МЛЭ выращенным *in situ* CdTe, плотность подвижного заряда, не превышает 9.0·10^9 $см^{-2}$, что меньше чем для АОП и для двухслойного низкотемпературного диэлектрика SiO_2/Si_3N_4, для которых плотности подвижного заряда составляют величины не менее 3.2·10^{11} $см^{-2}$ и 3·10^{10} $см^{-2}$, соответственно. Плотность фиксированного заряда для МДП-структур, пассивированных слоями CdTe, составляет величину (2.5-5.5)·10^{10} $см^{-2}$, что в среднем ниже, чем значения

для SiO_2/Si_3N_4 и значительно ниже плотности фиксированного заряда для структур с АОП, которая достигает величины $1.3\cdot10^{12}$ $см^{-2}$. Плотность поверхностных состояний для МДП-структур на основе ГЭС HgCdTe МЛЭ, пассивированных выращенными *in situ* слоями CdTe, составляет величину не более $2.7\cdot10^{11}$ $эВ^{-1}см^{-2}$ при T=78K.

В заключении диссертационной работы сформулированы следующие основные результаты, полученные в ходе проведения исследований.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1) Экспериментальные исследования электрофизических характеристик МДП-структур на основе однородного по составу ГЭС *n(p)*-$Hg_{1-x}Cd_xTe$ (x=0.21-0.23, x=0.29-0.38) МЛЭ показали, что при температурах 77-100К доминирующим механизмом генерации неосновных носителей в режиме сильной инверсии для МДП-структур на основе *n*-$Hg_{1-x}Cd_xTe$ (x=0.21-0.23) МЛЭ является туннелирование через глубокие уровни, а для МДП-структур на основе *p*-$Hg_{1-x}Cd_xTe$ (x=0.22) важную роль играют процессы межзонного туннелирования при концентрации дырок, превышающей 10^{16} $см^{-3}$. Высокотемпературный спад дифференциального сопротивления ОПЗ связан с диффузией неосновных носителей из квазинейтрального объема к поверхности при повышении роли межзонной Оже – рекомбинации.
2) Исследования фотоэлектрических характеристик МДП-структур на основе однородного по составу ГЭС $Hg_{1-x}Cd_xTe$ МЛЭ показали, что зависимости фотоЭДС от напряжения для МДП-структур на основе ГЭС *n*-$Hg_{1-x}Cd_xTe$ (x=0.21-0.23) МЛЭ имеют резко выраженный максимум в начале инверсии. Последующий спад зависимости фотоЭДС от напряжения связан с увеличением скорости туннельной генерации неосновных носителей через глубокие уровни в сильной инверсии. Зависимости фотоЭДС от напряжения для МДП-структур на основе более широкозонного ГЭС *n*-$Hg_{1-x}Cd_xTe$ (x>0.3) МЛЭ обычно имеют вид, близкий к «классическому»: фотоЭДС возрастает в режимах обеднения и слабой инверсии, а в режиме сильной инверсии постоянна и максимальна. Для части МДП-структур на основе ГЭС *p*-$Hg_{1-x}Cd_xTe$ (x=0.22) МЛЭ наблюдалась значительная компонента фотоЭДС в обогащении, возможной причиной которой являются неоднородности по темновому сопротивлению из-за подлегирующего действия электрически активных дефектов.
3) Показано, что существенное влияние на измеряемую емкость и проводимость МДП-структур на основе ГЭС $Hg_{1-x}Cd_xTe$ МЛЭ оказывает сопротивления объема однородной эпитаксиальной пленки. Обнаружен эффект спада емкости в обогащении при увеличении напряжения смещения на ВФХ МДП-структур на основе ГЭС *n*-$Hg_{0.78}Cd_{0.22}Te$ МЛЭ с имеющим большую емкость анодным оксидом в качестве диэлектрика из-за влияния сопротивления объема эпитаксиальной пленки. Предложена методика обработки экспериментальных данных, позволяющая исключить влияние сопротивления объема эпитаксиальной пленки на измеряемые электрофизические характеристики.
4) Экспериментально показано, что создание приповерхностного варизонного слоя с повышенным составом приводит к изменению низкочастотной ВФХ

МДП-структур на основе ГЭС $Hg_{1-x}Cd_xTe$ МЛЭ: емкость в минимуме ВФХ принимает меньшие значения, а провал емкости становится более широким. Установлено, что для МДП-структур на основе ГЭС $Hg_{1-x}Cd_xTe$ МЛЭ с диэлектриками типа АОП или SiO_2/Si_3N_4 создание варизонного слоя вызывает увеличение гистерезиса ВФХ, что связано с увеличением плотности подвижного заряда в диэлектрике.

5) В результате численного решения уравнения Пуассона для неоднородного по составу ГЭС $Hg_{1-x}Cd_xTe$ МЛЭ проведен расчет зависимостей потенциала от напряжения и ВФХ МДП-структур на основе ГЭС $Hg_{1-x}Cd_xTe$ МЛЭ с приповерхностным варизонным слоем. Расчеты проводились для линейного и экспоненциального профилей состава с величиной состава 0.43-0.48 на поверхности при толщине варизонного слоя 0.2-0.5 мкм. Показано, что наличие варизонного слоя приводит к более глубокому и широкому провалу емкости на НЧ ВФХ, что связано с изменением условий генерации неосновных носителей заряда из-за уменьшения собственной концентрации в приповерхностном варизонном слое. Влияние наличия варизонного слоя на высокочастотной ВФХ проявляется в уменьшении емкости МДП-структуры в режиме сильной инверсии.
6) Установлено, что создание приповерхностного варизонного слоя существенно изменяет фотоэлектрические характеристики МДП-структур на основе ГЭС *n*-$Hg_{1-x}Cd_xTe$ (x=0.21-0.23) МЛЭ, что связано с подавлением туннельной генерации через глубокие уровни в ОПЗ. Создание варизонного слоя также уменьшает частоту среза на зависимости фотоЭДС от частоты, что связано с увеличением дифференциального сопротивления ОПЗ.
7) Экспериментально обнаружено появление максимумов на ВФХ в режиме обеднения при освещении структур инфракрасным излучением (λ=0.94 мкм) для МДП-структур на основе однородного по составу *n*-$Hg_{1-x}Cd_xTe$ (x=0.21-0.23), а также для МДП-структур на основе варизонного *n*-$Hg_{1-x}Cd_xTe$ большего состава (x=0.34). Показано, что данные максимумы связаны с процессами перезарядки емкости глубоких уровней в $Hg_{1-x}Cd_xTe$ МЛЭ при подсветке инфракрасным излучением.
8) Экспериментальные исследования характеристик МДП-структур на основе варизонного *p*-$Hg_{0.78}Cd_{0.22}Te$ МЛЭ с различным составом на поверхности позволили установить, что при увеличении состава на поверхности от 0.34 до 0.49-0.58 при толщине варизонного слоя (1.6-1.8) мкм, наблюдается увеличение дифференциального сопротивления области пространственного заряда, что проявляется в переходе ВФХ, измеренной на частоте 10 кГц, к высокочастотному виду, также происходит подавление межзонной туннельной рекомбинации, что следует из перехода зависимости фотоЭДС к классическому виду.
9) Экспериментально исследовано влияние областей с периодическими резкими неоднородностями по составу толщиной 48-54 нм на электрофизические и фотоэлектрические характеристики МДП-структур на основе варизонного *n*-$Hg_{1-x}Cd_xTe$ МЛЭ (x=0.29-0.31), при различном расположении этих областей относительно границы раздела с диэлектриком. Показано, что наибольшее влияние на электрофизические и фотоэлектрические характеристики оказывают

резкие неоднородности по составу, расположенные непосредственно вблизи границы раздела диэлектрик – полупроводник. Это влияние заключается в увеличение эффективной толщины диэлектрика, что может быть вызвано тем, что области повышенного состава образуют потенциальные барьеры для электронов, а также в уменьшении времени жизни неравновесных носителей, что может быть связано с рекомбинацией на границах областей с резким изменением состава.

10) Предложена физическая модель формирования электрофизических и фотоэлектрических характеристик МДП-структур на основе ГЭС *n*(*p*)-$Hg_{1-x}Cd_xTe$ МЛЭ (x=0.21-0.38) с учетом варизонных приповерхностных слоев с экспоненциальным распределения состава CdTe и наличием последовательного сопротивления рабочего однородного слоя эпитаксиальной структуры в диапазоне частот (10^3-10^6) Гц, которая адекватно описывает экспериментальные характеристики.

11) Предложены методики определения основных параметров МДП-структур на основе ГЭС $Hg_{1-x}Cd_xTe$ МЛЭ с приповерхностным варизонным слоем повышенного состава. Показано, что при определении плотности поверхностных состояний в МДП-структурах на основе варизонного ГЭС $Hg_{1-x}Cd_xTe$ МЛЭ необходим учет наличия варизонного слоя, а также влияния сопротивления объема эпитаксиальной пленки и эффектов вырождения и непараболичности зон.

12) Экспериментально показано, что нанесение в качестве пассивирующего покрытия АОП приводит к появлению большего положительного фиксированного заряда 1.3×10^{12} см$^{-2}$. Плотность подвижного заряда составляет величину около 3.2×10^{11} см$^{-2}$, а плотности поверхностных состояний вблизи середины запрещенной зоны примерно 1.6×10^{11} эВ$^{-1}$·см$^{-2}$. В данном случае, появление положительного фиксированного заряда связано с наличием вакансий кислорода в анодно-окисной пленке. Для данного диэлектрического покрытия типична одинаковая разность хода прямой и обратной развертки вольт-фарадных характеристик для режимов обогащения – обеднения и слабой инверсии приповерхностной области полупроводника. Этот тип гистерезиса может быть связан со смещением подвижного заряда в диэлектрике под действием напряжения смещения.

13) При нанесении в качестве диэлектрика SiO_2/Si_3N_4 на поверхность варизонного HgCdTe, имеет место гистерезис прямого и обратного хода развертки по напряжению на ВФХ. Наблюдаемый вид гистерезиса, может быть связан с захватом электронов на состояния в приграничной области диэлектрика для режимов обогащения и обеднения с последующим выбросом из состояний в диэлектрике обратно в полупроводник в режиме инверсии. Фиксированный заряд в данном диэлектрике зависит от технологии его нанесения, и может достигать величины 1.3×10^{11} см$^{-2}$. Минимальная плотность подвижного заряда для структур без варизонного слоя, определенного вблизи напряжения плоских зон, составляет 3.2×10^{10} см$^{-2}$, а плотности поверхностных состояний не превышает величину 1.2×10^{11} эВ$^{-1}$·см$^{-2}$.

14) В процессе исследования влияния различных видов диэлектриков на свойства границ раздела HgCdTe/защитный диэлектрик установлено, что используемый

в качестве защитного диэлектрика слой CdTe, толщиной 0.2 мкм, нанесенный *in situ* на поверхность варизонного HgCdTe, дает качественную границу раздела с плотностью поверхностных состояний не более $2.7 \cdot 10^{11}$ $эВ^{-1}см^{-2}$. Минимальное значение фиксированного заряда составляет $5.5 \cdot 10^{10}$ $см^{-2}$, а плотность подвижного заряда не превышает величину порядка $9.0 \cdot 10^{9}$ $см^{-2}$.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

Патент Российской Федерации:

1. Пат. 2396635 Российская Федерация, МПК H 01 L 31/101. Фоточувствительная к инфракрасному излучению структура и способ его изготовления / Войцеховский А. В., Несмелов С. Н., *Дзядух С. М.*, Сидоров Ю. Г., Дворецкий С. А., Михайлов Н. Н., Варавин В. С., Якушев М. В., Васильев В. В. ; заявители и патентообладатели ТГУ, ИФП СО РАН. − № 2009130692/28 ; заявл. 11.08.09 ; опубл. 10.08.10, Бюл. № 22. − 2 с.

Статьи в журналах, рекомендованных ВАК:

1. Войцеховский А. В. Влияние сопротивления объема эпитаксиальной пленки на вольт-фарадные характеристики МДП-структур HgCdTe/АОП и HgCdTe/SiO_2/Si_3N_4 / А. В. Войцеховский, С. Н. Несмелов, *С. М. Дзядух* // Известия ВУЗов. Физика. – 2005. – № 6. – С. 31-37.
2. Войцеховский А. В. Фотоэлектрические характеристики МДП-структур на основе варизонного n-HgCdTe (x=0,21-0,23) / А. В. Войцеховский, С. Н. Несмелов, *С. М. Дзядух*, В. С. Варавин, С. А. Дворецкий, Н. Н. Михайлов, Ю. Г. Сидоров, В. В. Васильев, Т. И. Захарьяш, Ю. П. Машуков // Известия ВУЗов. Физика. – 2006. – № 10. – С. 70-80.
3. Войцеховский А. В. Электрофизические и фотоэлектрические свойства МДП-структур на основе варизонного КРТ МЛЭ / А. В. Войцеховский, С. Н. Несмелов, *С. М. Дзядух*, В. С. Варавин, С. А. Дворецкий, Н. Н. Михайлов, Ю. Г. Сидоров, В. В. Васильев, Т. И. Захарьяш, Ю. П. Машуков // Прикладная физика. – 2007. – № 2. – С. 100-106.
4. Войцеховский А. В. Свойства МДП-структур на основе HgCdTe, выращенного методом молекулярно-лучевой эпитаксии / А. В. Войцеховский, С. Н. Несмелов, *С. М. Дзядух* // Известия ВУЗов. Материалы электронной техники. – 2007. – № 3. – С. 31-36.
5. Войцеховский А. В. Исследование границ раздела HgCdTe/АОП и HgCdTe/SiO2-Si3N4 / А. В. Войцеховский, С. Н. Несмелов, *С. М. Дзядух*, В. С. Варавин, С. А. Дворецкий, Н. Н. Михайлов, Ю. Г. Сидоров, В. В. Васильев, Т. И. Захарьяш, Ю. П. Машуков // Прикладная физика. – 2008. – № 4. – С. 110-115.
6. Войцеховский А. В. Свойства МДП структур на основе варизонного HgCdTe, выращенного методом молекулярно-лучевой эпитаксии / А. В. Войцеховский, С. Н. Несмелов, *С. М. Дзядух*, В. С. Варавин, С. А. Дворецкий, Н. Н. Михайлов, Ю. Г. Сидоров, В. В. Васильев // Физика и техника полупроводников. – 2008. – Т. 42, № 11. – С. 1327-1332.
7. Войцеховский А. В. Исследование методами проводимости и фотоЭДС МДП-структур на основе варизонного гетероэпитаксиального HgCdTe, выращенного

методом молекулярно-лучевой эпитаксии / А. В. Войцеховский, С. Н. Несмелов, *С. М. Дзядух* // Известия ВУЗов. Физика. – 2009. – № 10. – С. 3-18.
8. Войцеховский А. В. Электрофизические характеристики МДП-структур на основе варизонного HgCdTe МЛЭ с выращенными in situ CdTe в качестве диэлектрика / А. В. Войцеховский, С. Н. Несмелов, *С. М. Дзядух*, В. С. Варавин, С. А. Дворецкий, Н. Н. Михайлов, Ю. Г. Сидоров, В. В. Васильев, М. В. Якушев // Известия ВУЗов. Физика. – 2010. – № 2. – С. 40-45.
9. Войцеховский А. В. Фотоэлектрические характеристики МДП-структур на основе материала кадмий-ртуть-теллур, полученного методом молекулярно-лучевой эпитаксии / А. В. Войцеховский, С. Н. Несмелов, *С. М. Дзядух*, В. В. Васильев, В. С. Варавин, С. А. Дворецкий, Н. Н. Михайлов, Ю. Г. Сидоров, Ю. П. Машуков, М. В. Якушев // Прикладная физика. – 2010. – № 3. – С. 119-123.
10. Voitsekhovskii A. V. Influence of near-surface graded-gap layers on electrical characteristics of MIS-structures based on MBE grown HgCdTe / A. V. Voitsekhovskii, S. N. Nesmelov, *S. M. Dzyadukh*, V. S. Varavin, S. A. Dvoretskii, N. N. Mikhailov, Yu. G. Sidorov, M. V. Yakushev // Opto-electronics review. – 2010. – № 18 (3). – P. 259-262.
11. Voitsekhovskii A. V. Capacitance-voltage characteristics of MIS-structures on the basis of graded-band MBE $Hg_{1-x}Cd_xTe$ at passivation by epitaxially grown in situ CdTe / A. V. Voitsekhovskii, S. N. Nesmelov, *S. M. Dzyadukh*, V. S. Varavin, S. A. Dvoretskii, N. N. Mikhailov, Yu. G. Sidorov, M. V. Yakushev // Opto-electronics review. – 2010. – № 18 (3). – P. 263-266.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Войцеховский А. В. Фотоэлектрические МДП-структуры из узкозоных полупроводников / А. В. Войцеховский, Давыдов В. Н. – Томск : Радио и связь, Томский отдел, 1990. – 327 с.
2. Матричные фотоприемные устройства инфракрасного диапазона / В. Н. Овсюк [и др.]. − Новосибирск : Наука, 2001. − 376 с.
3. Овсюк В. Н. Исследование вольт-фарадных характеристик МДП-структур на основе МЛЭ HgCdTe n- и p-типа / В. Н. Овсюк, А. В. Ярцев // Прикладная физика. − 2007. −№ 5. − С. 80-83.
4. Фоточувствительные свойства структур ZnTe/CdTe/HgCdTe / А. А. Гузев [и др.] // Прикладная физика. – 2009. – № 2. – С. 92-96.
5. Van Halen P. Accurate, short series approximations to Fermi–Dirac integrals of order −1/2, 1/2, 1, 3/2, 2, 5/2, 3, and 7/2 / Halen P. Van, D. L. Pulfrey // J. Appl. Phys. − 1985. − Vol. 57, № 12. − P. 5271-5274.

Тираж 120 экз.
Отпечатано в ООО «Позитив-НБ»
634050 г. Томск, пр. Ленина 34а